

ОБНАРУЖЕНИЕ ШУМОПОДОБНЫХ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ПО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

В.Н. Бондаренко

*доктор технических наук, профессор
профессор каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: vbondarenko@sfu-kras.ru*

Т.В. Краснов

*кандидат технических наук
доцент каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: krasnovtv@ya.ru*

В.Ф. Гарифуллин

*ст. преп. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: vadimgar@mail.ru*

М.М. Валиханов

*доцент каф. «Радиотехника»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: marat_valihanov@mail.ru*

В.В. Сухотин

*доцент каф. «Радиоэлектронные системы»
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»
660074, Красноярск, ул. ак. Киренского, 28
E-mail: marat_valihanov@mail.ru*

Предложен квазиоптимальный алгоритм поиска по времени запаздывания шумоподобных сигналов с минимальной частотной модуляцией формата MSK-BOC. Проведен анализ его помехоустойчивости, приведены результаты статистического моделирования рассмотренного алгоритма.

Ключевые слова: шумоподобный сигнал, поиск сигнала, помехоустойчивость, минимальная частотная модуляция, бинарная офсетная модуляция

A quasi-optimal search algorithm for time delay of spread spectrum signal with minimum shift

keying of MSK-BOC format is proposed. It is shown that searching algorithm provides entire benefits in realization in comparison with the optimal algorithm and the loss in immunity is less than 1,5 dB .

Keywords: *Spread Spectrum Signal, search signal, interference immunity, minimum shift keying, binary offset carrier modulated*

Перспективным способом модуляции сигналов в широкополосных радионавигационных системах является бинарная офсетная модуляция или *binary offset carrier modulated (BOC)*. Благодаря широкому спектру используемых сигналов, которые принято называть меандровыми шумоподобными сигналами (ШПС) или *BOC* сигналами [1], обеспечиваются высокие тактические показатели систем (точность измерения кодовой задержки, устойчивость к помехам многолучёвости и др.).

Широкому использованию *BOC* сигналов в наземных широкополосных радионавигационных системах препятствует присущая им ограниченность спектрального ресурса. Однако сочетание *BOC* с минимальной частотной модуляцией или *minimum shift keying (MSK)* позволяет существенно ослабить негативное влияние ограничения спектра ШПС на основные тактические показатели широкополосных систем [1].

Многопиковый вид автокорреляционной функции (АКФ) *BOC* сигналов создаёт известные трудности при разработке алгоритмов поиска и кодовой синхронизации, связанные с устранением неоднозначности и уменьшением до приемлемых значений риска синхронизации по боковым пикам АКФ. Решение проблемы поиска требует заметных усилий, особенно при малом энергопотенциале, поскольку различие основного и боковых пиков АКФ не превышает 3 дБ.

Цель работы – синтез квазиоптимального двухэтапного алгоритма поиска по времени запаздывания шумоподобных сигналов с минимальной частотной модуляцией формата *MSK-BOC*, а также анализ помехоустойчивости предложенного алгоритма.

Следуя общепринятым обозначениям, для сигнала с модифицированной минимальной частотной модуляцией будем использовать аббревиатуру *MSK-BOC* (m, n), где m и n – целые числа, определяющие кратность частоты меандровой последовательности и тактовой частоты дальномерного кода некоторой опорной частоте: $m = f_m / f_{оп}$, $n = f_t / f_{оп}$. При фиксированной тактовой частоте основные характеристики *BOC* сигнала определяются соотношением частот $m / n = f_m / f_t$. По этой причине для указанных сигналов будем использовать обозначение *MSK-BOC* (l), где $l = 2m / n = 2f_m / f_t$ – число «полуволин косинуса» в элементах квадратурных сигналов. С ростом l возрастает число локальных максимумов АКФ сигнала (число раз но полярных пиков равно $l + 1$).

Сигнал $MSK-BOC(l)$ отличается от ШПС с традиционной модуляцией MSK видом элементов (чипов) $S_0(t)$ квадратурных видеосигналов:

$$S_0(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{l\pi}{T}\left(t + \frac{T}{2}\right)\right) = \sin\left(\frac{l\pi t}{T} + l\frac{\pi}{2}\right), & |t| \leq T/2; \\ 0, & |t| > T/2, \end{cases} \quad (1)$$

представляющих собой l знакопеременных импульсов в форме полуволны косинуса длительностью T_m/l , где $T_m = 1/f_m$. При $l = 1$ выражение (1) определяет форму чипов при традиционной MSK [2]:

$$S_0(t) = \begin{cases} \cos(\pi t/T), & |t| \leq T/2; \\ 0, & |t| > T/2, \end{cases}$$

где T – длительность элемента квадратурных сигналов.

Поскольку отличие АКФ сигналов с модуляцией $MSK-BOC$ от сигналов MSK проявляется лишь в форме главного лепестка (наряду с центральным имеются боковые пики), то для поиска таких сигналов можно использовать те же алгоритмы, что и в случае MSK сигналов.

В соответствии с алгоритмом поиска каждый канал устройства поиска (рис. 1) содержит два квадратурных коррелятора, осуществляющих приём и обработку каждого из двух сигналов на «верхней» ω_1 и «нижней» ω_2 частотах. Квадратурный расщепитель является общим для всех каналов устройства поиска и содержит четыре перемножителя (по два на каждый частотный канал), на опорные входы которых подаются гармонические сигналы частот ω_1 и ω_2 соответственно с фазами 0 и $\pi/2$.

Принятая реализация $y(t)$, представляющая смесь сигнала и шума, перемножается с опорными сигналами частот ω_1 и ω_2 (по две квадратуры для каждой из частот). Затем каждая из четырёх компонент выходного сигнала квадратурного расщепителя перемножается с соответствующим опорным сигналом: $d_1(t - \tau_k) = C(t - \tau_k) - S(t - \tau_k)$ и $d_2(t - \tau_k) = C(t - \tau_k) + S(t - \tau_k)$ в каналах приёма частот ω_1 и ω_2 с задержкой $\tau_k, k = \overline{1, M}$ (M – число каналов устройства поиска, равное числу ячеек поиска; $M = 2N$ при шаге $\Delta\tau = T/2$) Результаты перемножения интегрируются на интервале наблюдения T_c , образуя квадратурные составляющие корреляционного интеграла на двух частотах.

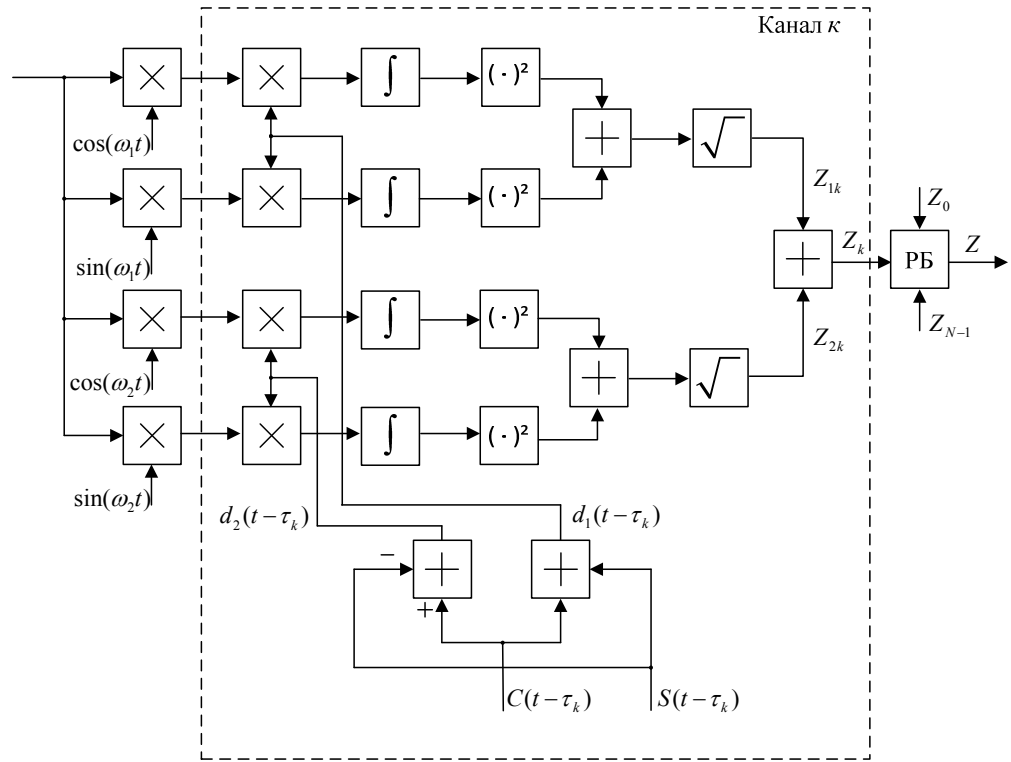


Рис. 1. Структура квазиоптимального алгоритма поиска *MSK-BOC* сигнала (приём на «верхней» и «нижней» частотах)

На основе квадратурных корреляций вычисляются модули ВКФ. Для обеспечения требуемого отношения сигнал/шум интервал интегрирования выбирается кратным периоду T_{Π} повторения кода: $T_c = nT_{\Pi}$, n – целое. При модуляции сигнала (1) данными накоплению (некогерентному суммированию) подлежат статистики $Z_k = Z_{1k} + Z_{2k}$, образуя выходные величины каналов.

Принятие решения о значении параметра τ производится на основе выбора максимальной из выходных величин каналов.

При шаге поиска $\Delta = T_m / 2$ ошибка синхронизации не превысит по абсолютной величине значения $\Delta / 2 = T_m / 4$ (при правильном завершении поиска). Для уточнения значения параметра τ производится допоиск на интервале $[-T_m / 4, T_m / 4]$: определение положения главного пика АКФ *MSK-BOC* сигнала. Для этого используется традиционная параллельная процедура поиска с размером ячейки $\Delta_d = T_m / 4$ и числом каналов, равным 3.

Качественные показатели описанной процедуры поиска характеризуются вероятностью $P_{\text{ош}}$ аномальных ошибок, превышающих половину шага доиска $\Delta_d = T_m / 4$ (по абсолютной величине), а также временем поиска t_{Π} , которое равно суммарному времени

анализа на обоих этапах поиска. Вместо вероятности $P_{\text{ош}}$ можно использовать вероятность правильного окончания поиска $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{ош}}$.

В худшем случае, когда в отсутствие аномальных ошибок по завершении поиска ошибка синхронизации достигает значения $\Delta / 2 = T_{\text{м}} / 4$ (при шаге поиска $\Delta / 2 = T_{\text{м}} / 4$), вероятность ошибки можно определить с использованием формулы:

$$P'_{\text{ош}} \approx lN \left[1 - \Phi \left(\frac{q_1(1 - 1/2l)}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (2)$$

где $\Phi(x)$ – интеграл вероятности; $R_1(\tau)$ – автокорреляционная функция кодовых последовательностей $C(t)$ и $S(t)$; $\delta\tau = \tau - \hat{\tau}$ – ошибка синхронизации; $q_1 = \sqrt{n_1} q_{\text{п}} / \eta$ – отношение сигнал/шум на выходе «синхронного» канала (с учетом некогерентного накопления); $q_{\text{п}} = \left(\frac{A^2}{N_0} T_{\text{п}} \right)^{1/2}$ – отношение сигнал/шум на квадратурных выходах коррелятора; η – проигрыш в отношении сигнал/шум, обусловленный некогерентностью накопления. Для значений $q_1 \geq 5$ дБ, представляющих практический интерес, проигрыш η составляет менее 6 дБ [2].

В случае оптимального алгоритма вероятность ошибки определяется формулой

$$P_{\text{ош}} \approx 2lN \left[1 - \Phi \left(\frac{qR(T_{\text{м}}/8)}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (3)$$

При равной вероятности $P_{\text{ош}}$ рассмотренный двухэтапный алгоритм поиска проигрывает оптимальному алгоритму параллельного поиска по времени $t_{\text{п}}$, что эквивалентно энергетическому проигрышу

$$\varepsilon = \frac{T_{\text{а1}} + T_{\text{а2}}}{T_{\text{а}}} = \frac{q_1^2 + q_2^2}{q^2}, \quad (4)$$

где $T_{\text{а1}} = \sqrt{n_1} T_{\text{п}}$ и $T_{\text{а2}} = \sqrt{n_2} T_{\text{п}}$ – время анализа на первом и втором этапах поиска; $T_{\text{а}} = \sqrt{n} T_{\text{п}}$ – время анализа для оптимального алгоритма поиска.

Используя формулы (2),(3), можно оценить требуемое для обеспечения заданной вероятности ошибки отношение сигнал/шум. Как показывают расчёты, для $P_{\text{ош}} \approx 10^{-4}$ энергетический проигрыш $\varepsilon \approx 2$ дБ и $\varepsilon \approx 1,5$ дБ при $l=2$ и $l=4$ соответственно.

Таким образом, для поиска сигнала *MSK-BOC(2)* целесообразно использовать традиционную параллельную процедуру поиска с размером ячейки. Применение на первой ступени алгоритма поиска по огибающей кода (без поднесущей) с дискретом $T/2$ не приводит

к существенному сокращению аппаратных затрат, т.к. сокращение числа ячеек поиска в 2 раза нивелируется увеличением числа квадратурных корреляторов в два раза (по числу частот приема). Для определения положения главного пика АКФ необходима вторая ступень поиска - допоиск основного пика АКФ на интервале одного элемента кода (параллельная процедура поиска с размером ячейки $\Delta\tau = \frac{T}{8} = \frac{T_M}{8}$), что требует дополнительных временных затрат, сопоставимых с временем поиска на первой ступени.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что рассмотренный двухэтапный алгоритм поиска обеспечивает существенные преимущества в реализации, проигрывая оптимальному алгоритму по времени поиска не более 2дБ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-38-00171).

Литература

1. Ярлыков М. С. Характеристики меандровых сигналов (ВОС – сигналов) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения. – М.: Радиотехника, 2008, № 8.
2. Бондаренко, В.Н. Широкополосные радионавигационные системы с шумоподобными частотно-манипулированными сигналами/ В.Н. Бондаренко, В.И. Кокорин // Новосибирск: «Наука». – 2011. – 263 с.
3. Kalashnikova A.S., Sukhotin V.V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access. 2015 International Siberian Conference 011 Control and Communications (SIBCON). Proceedings. -Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21-23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2. 10.1109/SIBCON.2015.7147083
4. Low profile phased array antenna with combined electronical and mechanical beam steering for satellite communications/ Ye. A. Litinskaya, V. S. Panko, S. V. Polenga, Yu. P. Salomatov// 24nd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, p. 461-462. DOI: [10.1109/CRMICO.2014.6959479](https://doi.org/10.1109/CRMICO.2014.6959479)

DETECTION OF SPREAD SPECTRUM FREQUENCY-MANIPULATED SIGNALS WITH TIME DELAY

V.N. Bondarenko

PhD, Prof.

*Professor, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074
E-mail: vbondarenko@sfu-kras.ru*

T.V. Krasnov

PhD

*docent, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074
E-mail: krasnovtv@ya.ru*

V.F. Garifullin

*Post-graduate student, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074
E-mail: yadimgar@mail.ru*

M.M. Valikhanov

PhD

*docent, "Radiotechnics" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074
E-mail: faust_256@mail.ru*

V.V. Sukhotin

PhD

*docent, "Radioelectronic systems" department,
Engineering physics and radioelectronics institute, Siberian Federal University
bld. 28, Kirensky str., Krasnoyarsk, 660074
E-mail: faust_256@mail.ru*

In the article there is a quasi-optimal double-level search algorithm the spread spectrum signal (SSS) with minimal frequency shift keying of MSK-BOC format due to delay time. On the first level there is a search on the envelope line of code (without subcarrier frequency) with cell size equal to meander chip duration. The search algorithm for MSK-BOC signal, which is invariant to subcarrier frequency is based on considering of every quadrature signal component as two components on «high» and «low» frequencies. On the second level the additional search of main peak of MSK-BOC signal is produced. For this case the traditional parallel procedure of searching the cell size equal to a half of meander chip duration and equal and with three channels is used.

The immunity analysis of considered search algorithm is produced with using a probability of abnormal errors exceeding a half of additional searching step as criterion. The analysis results show

that the loss in immunity of quasi-optimal searching algorithm in comparison with the optimal searching algorithm is less than 1,5 dB and it is entirely repaid by the benefits of practical implementation.

References

1. Yarlykov M. S. Features mangrovyh signals (BOC – signals) to the satellite navigation systems of new generation. – M.: Radio Engineering, 2008, № 8..
2. Bondarenko V.N. Broadband radio navigation system with noise-like frequency-manipulated signals/ V. N. Bondarenko, V. I. Kokorin // Novosibirsk: Nauka. – 2011. – 263 p.
3. Kalashnikova A.S., Sukhotin V.V. Consideration of Methods to Protect Frequency Resources of Satellite System Against Unauthorized Access. 2015 International Siberian Conference 011 Control and Communications (SIBCON). Proceedings. -Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk. May 21-23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2. 10.1109/SIBCON.2015.7147083
4. Low profile phased array antenna with combined electronical and mechanical beam steering for satellite communications/ Ye. A. Litinskaya, V. S. Panko, S. V. Polenga, Yu. P. Salomatov// 24nd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2014). 7—13 September, Sevastopol, Crimea, Russia, p. 461-462. DOI: [10.1109/CRMICO.2014.6959479](https://doi.org/10.1109/CRMICO.2014.6959479)